

Didaktik der Physik Frühjahrstagung – Dresden 2017

Physics by Inquiry – Ein Konzept zur Einführung in die Physik

Lutz Kasper

PH Schwäbisch Gmünd – Abteilung Physik

lutz.kasper@ph-gmuend.de

Kurzfassung

Unter dem Label *Inquiry-based* sind in den letzten Jahren diverse Lehrkonzepte entwickelt worden. Der hier vorgestellte Lehransatz hat sogar eine Entwicklungsgeschichte, die bis in die 1970er Jahre zurückreicht. Gleichwohl sind *Physics by Inquiry* wie auch Arnold Arons, auf dessen Grundideen der Ansatz beruht, im deutschsprachigen Raum wenig bekannt. Die klare Zielstellung besteht in der Verbesserung des konzeptuellen Physikverständnisses von Studienanfängern. Die hervorstechenden Merkmale sind eine Betonung operationalen Wissens, das Prinzip, physikalische Konzepte in experimenteller Arbeit und unter Verwendung von Alltagssprache zu entwickeln, um es erst dann in Fachtermini zu fassen (*ideas first, name later*) sowie die aus den Experimenten sich ergebende Notwendigkeit einer intensiven Auseinandersetzung mit Messunsicherheiten. Der vorliegende Artikel beschreibt beispielhaft Facetten dieses Lehrkonzeptes und versucht die Relevanz für die Hochschulausbildung insbesondere in den Lehramtsstudiengängen aufzuzeigen.

1. Einführung

Das hier beschriebene Konzept „Physics by Inquiry“ geht im Wesentlichen auf die Arbeiten des US-amerikanischen Physikers und Physikdidaktikers Arnold B. Arons zurück [1], [2], der sich wiederum in seiner didaktischen Entwicklung stark von Sokrates, Plato und Piaget beeinflussen ließ. Arons beklagte nach jahrelanger Lehrerfahrung ein mangelndes Verständnis physikalischer Konzepte bei Studierenden und führte es vor allem auf die „Normalform“ der Physikvermittlung zurück, welche traditionell durch den Stil des „teaching by telling“ geprägt ist. In diesem Modus findet ein zu geringer Anteil an verbaler Interpretation von Experimenten, Berechnungen oder grafischen Darstellungen durch die Studierenden selbst statt. Natürlich gibt es in Studiengängen mit oft dreistelligen Studierendenzahlen in den ersten Semestern nachvollziehbare Gründe für eine solche Form des Lehrens. Anders sieht es aber in den Lehramtsstudiengängen aus, deren Jahrgangsgrößen oft „handlich“ genug sind für eine zur reinen Vorlesung alternativen Lehrform. Eine solche Methode wird in diesem Artikel beschrieben und als geeignet gesehen für die fachwissenschaftlichen Einführungsveranstaltungen in der Ausbildung von Physik- und Naturwissenschaftslehrkräften insbesondere in den Lehramtsstudiengängen Primarstufe und Sekundarstufe I. Die vorrangige Zielstellung dieses Lehransatzes besteht darin, die von Arons beklagten Lücken im konzeptuellen Physikverständnis zu Beginn des Studiums erst gar nicht aufreißen zu lassen. Einen überzeugenden Erfolg von *Physics by Inquiry* kann der Autor hier lediglich auf der Basis der Lehrerfahrungen eines von ihm an einer US-Universität einsemestrig durchgeführten Kurses und der damit verbundenen Leistungsüberprüfungen und Lehrevaluation bestäti-

gen. Verallgemeinerungen der hier gemachten Aussagen wären insofern nicht angemessen.

2. Grundpfeiler des Lehrkonzeptes

Das Lehrkonzept *Physics by Inquiry* ist aus der Perspektive des Jahres 2017 längst keine didaktische Neuerung mehr. Seine prägnanten Merkmale sind – jedes für sich gesehen – wohlbekannte wie auch anerkannte Gütekennzeichen fachdidaktischer Arbeit. In der konsistenten und aufeinander abgestimmten Bündelung dieser Merkmale sowie ihrer konsequenten Umsetzung weist das Konzept dennoch eine didaktische Insellage auf. Das gilt sowohl für die Physikausbildung in den USA als auch in Deutschland.

Die das Lehrkonzept bestimmenden Merkmale werden aus der Zielstellung eines verbesserten konzeptuellen Verständnisses von Physik abgeleitet. Einen der tragenden Grundpfeiler bildet dabei die Betonung eines *operational knowledge*, zu dem die konsequente Verwendung *operationaler Definitionen* physikalischer Begriffe und Konzepte beiträgt. Zur Illustration kann hier das eher triviale Beispiel des (physikalischen) Konzeptes „Fläche“ dienen. Bei aller Einfachheit hat der Flächenbegriff in der Physik eine grundlegende Bedeutung für darauf aufbauende Konzepte wie Druck, Energiefluss, magnetischer Fluss, Systemgrenzen, etc. Das Flächenkonzept trägt weiterhin Bedeutung für die Interpretation grafischer Darstellungen wie z.B. die Bestimmung der Geschwindigkeit aus $a(t)$ -Diagrammen bis hin zum allgemeinen Integralbegriff. An Stelle der von Lernenden schnell hingesagten „Länge-mal-Breite-Definition“, die im Allgemeinen nicht weiterhilft, lässt sich für die Fläche eine allgemein taugliche operationale Definition erarbeiten.

Die Grundidee der operationalen Definitionen ist es, dass sie auf gemeinsam gemachten und reproduzierbaren Erfahrungen (z.B. Messungen) beruhen und zunächst in möglichst einfachen Worten formuliert werden. Im Abschnitt 4.2 wird darauf näher eingegangen. Auf fortgeschrittenen Stufen kann dann zunehmend eine veränderte Sprache gewählt werden, die wiederum auf anderen, bereits bekannten fachlichen Konzepten beruht. Das Wesen des zu definierenden Objektes steckt jedoch nicht in dessen Fachterminus. Ergibt sich auf diese Weise die Definition eines z.B. für experimentelle Vorhersagen geeigneten und damit nützlichen physikalischen Konstruktes, kann ihm ein Name gegeben werden, nachdem man es sich erarbeitet und verstanden hat. Mit dieser Vorgehensweise ist das Merkmal „*idea first, name later*“ verbunden (siehe Abschnitt 4.1).

Operationale Definitionen stellen im Allgemeinen Messvorschriften dar und führen deshalb schnell auf das prinzipielle Problem der *Messunsicherheit*, welches in diesem Lehrkonzept eine erkennbare Betonung erfährt (siehe Abschnitt 4.4). Darüber hinaus wird der verbalen und grafischen Interpretation funktionaler Zusammenhänge in der Physik (*proportional reasoning*) viel Raum gegeben (siehe Abschnitt 4.3).

Neben solchen fach-methodischen Merkmalen kennzeichnen das Lehrkonzept auch Merkmale allgemeindidaktischer Art. So werden aus dem Ziel der Förderung konzeptuellen Wissens die Notwendigkeit möglichst häufiger und vielfältiger verbaler Interpretationen (von Experimenten, mathematischen Zusammenhängen, etc.) sowie wechselseitige Übersetzungen zwischen verschiedenen Repräsentationsformen abgeleitet. Dafür bestehen einerseits Gelegenheiten für die Studierenden untereinander in den Gruppenphasen sowie zwischen den Studierenden und Lehrenden in den Feedbackphasen. Letztere orientieren sich im Idealfall an der Methode des *sokratischen Dialoges* und stellen damit hohe Anforderungen an die Lehrenden (siehe folgenden Abschnitt 3).

Die Umsetzung aller bis hierhin genannten Merkmale von *Physics by Inquiry* setzt voraus, dass das Lernen ohne übermäßigen inhaltlichen Druck erfolgt. Das kann nur gelingen, wenn im Vergleich zu traditionellen Einführungskursen in die Physik eine deutliche Reduzierung der Inhalte bzw. des Lern tempos erfolgt. Arons beschreibt sehr pointiert die Inhaltsfülle vieler Physikcurricula in folgendem Zitat [3]: „*The relativistic model of instruction is based on the premise that, if one starts with an enormous breadth of subject matter but passes it by the student at sufficiently high velocity, the Lorentz contraction will shorten it to the point at which it drops into the hole which is the student mind.*“

Für den durch Reduktion erlittenen Tempoverlust steht ein sicher kleineres, aber dafür solide begründetes konzeptuelles Grundgerüst in Aussicht, auf

dem in der Folge dann auch ein zügigerer Fortschritt erreicht werden kann.

3. Universitäre Praxis – ein Beispiel

Im Folgenden werden aus der Sicht eines Lehrenden einige Eckdaten der Umsetzung von *Physics by Inquiry* im Fall semester (August bis Dezember) 2016 an der Grand Valley State University (GVSU) in Michigan vorgestellt. Der Autor hatte die Gelegenheit, im Rahmen einer Gastprofessur u.a. diesen Kurs zur Einführung in die Physik als kollaborativ durchgeführte Lehrveranstaltung gemeinsam mit einem Kollegen aus dem GVSU Physics Department durchzuführen.

Die Adressaten der Lehrveranstaltung sind hauptsächlich Studierende, die einen Abschluss als *Pre-College Teacher* in den Fächern Physik oder *Integrated Sciences* anstreben. Darüber hinaus nehmen auch einige wenige Studierende anderer Fachrichtungen im Rahmen eines *Liberal Arts* Studiums an diesem Kurs teil. Die Teilnehmer sind – bedingt durch die Laborraumgröße und vor allem wegen des besonderen Lehrkonzeptes – auf eine Anzahl von 24 begrenzt. Die außergewöhnlich umfangreiche Präsenzzeit beträgt wöchentlich drei mal 110 Minuten. Darüber hinaus müssen die Studierenden wöchentliche (benotete) Hausaufgaben bearbeiten, einen thematisch einschlägigen Essay verfassen sowie drei Tests absolvieren. Damit geht neben der Präsenzzeit auch ein erheblicher häuslicher Arbeitsaufwand einher.

Die Arbeit während der Lehrveranstaltung findet grundsätzlich immer in Gruppen zu drei oder vier Studierenden statt. Nach dem Prinzip *Guided Inquiry* erarbeiten sich die Studierenden anhand eines Textbooks [4] die zentralen Inhalte selbst. Dabei kommt den zahlreichen Experimenten mit oft einfachem Material eine Schlüsselrolle zu. Deren Planung und Interpretation findet in permanentem Austausch innerhalb der Gruppe statt. An den in regelmäßigen Abständen festgelegten so genannten *Checkouts*, die im Begleitmaterial gekennzeichnet sind, unterbrechen die Gruppen die Fortführung und es kommt zum Austausch mit einer Lehrkraft. An diesen Schlüsselstellen erfolgt ein fruchtbares Feedback in beiden Richtungen. Die Studierenden können ihr bis dahin erlangtes Verständnis im Dialog mit der Lehrkraft überprüfen und gegebenenfalls korrigieren. Die Lehrkraft erhält ihrerseits ein Bild vom Stand des Lernfortschritts in den einzelnen Gruppen. Diese Checkouts gehen jedoch über ein einfaches „Mini-Testat“ hinaus und erfolgen im Idealfall in sokratischer Weise. Typische und immer wiederkehrende Fragemuster und Impulse dieser Dialogphasen sind die Folgenden: „Beschreibe das Phänomen in deinen Worten!“, „Schätze die Größe des Effekts ab.“; „Wie können wir das wissen?“; „Warum glauben wir das?“; „Was würde geschehen, wenn ...?“; „Welche Informationen fehlen?“; „Kehre den Gedankengang einmal um.“

Neben dem Bereitstellen von Material und einer ggf. notwendigen Unterstützung beim experimentellen Arbeiten der Studierenden besteht die Arbeit der Lehrenden während der Präsenzzeit in genau diesen Checkout-Dialogen. Dies setzt eine gute Kenntnis von Studierenden-Präkonzepten, eine Antizipation möglicher Fallstricke des Lerninhaltes, eine gewisse Flexibilität bei der Bewertung unorthodoxer Lösungsvorschläge sowie die generelle Bereitschaft zur „Zurückhaltung“ im Lehrprozess voraus. Damit ist vor allem gemeint, im Anschluss an die Frageimpulse den Studierenden sorgfältig zuzuhören, ihnen „Denkpausen“ einzuräumen und selbst gegebene richtige Antworten zu vermeiden. Nur dann können von den Lehrenden tatsächlich auch latent vorhandene Fehlkonzepte und fehlerhafte Schlussweisen wahrgenommen werden.

In einem gewissen Rahmen bestimmen die Studierenden ihr Lerntempo selbst. Auch das gehört zum Konzept von *Physics by Inquiry*, erfordert dafür aber auch eine erhebliche Reduktion des Lehrstoffes. So wurden trotz des reichlichen Präsenzzeit-Aufwandes nur einige Themen aus der Mechanik und der Thermodynamik abgeschlossen. Allerdings wurden neben den konkreten Fachinhalten, und das ist gerade zu Beginn der Physikausbildung von besonderem Wert, auch fachmethodische Konzepte wie das Erstellen operationaler Definitionen (siehe 4.2), die Unterscheidung abhängiger und unabhängiger Variablen, die Interpretation funktionaler Zusammenhänge (siehe 4.3), der Umgang mit wissenschaftlichen Repräsentationen (Diagrammen, Tabellen, ...) und die Kenntnis prinzipiell vorhandener Messunsicherheiten (siehe 4.4) stark betont. Damit stehen die Studierenden auf einer konzeptuellen Basis, die sie sich anhand einfacher fachlicher Inhalte selbst erarbeitet haben und auf der sie im weiteren Verlauf ihres Studiums aufbauen können.

4. Beschreibung ausgewählter Prinzipien

4.1. „Ideas first – name later“

Dieses Prinzip wird im Folgenden beispielhaft in Anlehnung an die Einführung des Begriffs „Drehmoment“ (*turning effect*) an Balkenwaagen ($m \cdot r$) vorgestellt. Dabei steht m für die Masse von Probekörpern, r für deren Abstand vom Drehpunkt der Waage. Die Erweiterung des Begriffs führt schließlich zum Drehmoment ($F \cdot r$ bzw. $\mathbf{r} \times \mathbf{F}$).

Traditionell beginnt die Einführung eines neuen physikalischen Konzeptes mit der Nennung von Fachtermini (oft bereits in Überschrift). Es folgen dann mathematische Formulierungen sowie Anwendungen in verschiedenen Kontexten. Studierende haben auf diesem Weg jedoch oft Probleme mit einem grundlegenden Verständnis und auch mit einer Verknüpfung mit passenden Phänomenen. Im Fall des Drehmoments erfolgt die Einführung oft zu schnell, so dass eine Verbindung von Begriff und eigenen Erfahrungen der Studierenden fehlt (vgl. z.B. [1], S. 131). Für diese Studierenden erscheint

ein experimenteller Weg über die Beschreibung der Gleichgewichtsbedingung an Balkenwaagen als Verhältnisse der Art $m_1/m_2 = r_2/r_1$ und schließlich als Produkt $m_1 \cdot r_1 = m_2 \cdot r_2$ hilfreich. Das Produkt $m \cdot r$ kann dann als ein „Effekt“ (der Dreheffekt) interpretiert werden, der jeder Seite der Balkenwaage zugeordnet wird ([1], S. 132).

In der experimentellen Fortführung dieser Idee erscheinen dann mehrere verschiedene Massестücke in verschiedenen Abständen auf einer oder beiden Seiten der Balkenwaage. In der Ausführung als „Lochbalkenwaage“ (siehe Abb. 1) lassen sich problemlos viele Varianten umsetzen. Das Ziel ist dann die Erarbeitung der Gleichgewichtsbedingung in der verallgemeinerten Darstellung des Dreheffektes als

$$\sum (m_{\text{links}} \cdot r_{\text{links}}) = \sum (m_{\text{rechts}} \cdot r_{\text{rechts}}) \quad (1)$$

Haben die Studierenden die Nützlichkeit dieses Zusammenhanges – etwa für Vorhersagen des Gleichgewichts für verschiedene Konstellationen an der Balkenwaage – erfahren, erfolgt eine Anwendung auf Alltagskontexte. Ein Übergang von Massen zu Gewichtskräften erlaubt dann die Diskussion von Angriffspunkten von Kräften, weiterhin die Winkelabhängigkeit und schließlich den vektoriellen Charakter des „Effektes“. Aufgrund seiner Nützlichkeit für viele physikalische (und natürlich alltägliche) Anwendungen erhält auch dieser Effekt seinen Namen, das *Drehmoment*:

$$\mathbf{M} = \sum \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i \quad (2)$$

In einem solchen Ansatz, in dem sich Lernende neue physikalische Konzepte erarbeiten, für die sie im Allgemeinen keine Vorerfahrungen mitbringen, steht die „Idee“ am Anfang. Die Benennung erfolgt – in Übereinstimmung zur historischen Entwicklung – im Anschluss. Die Betonung im Lernprozess sollte auf der Idee liegen, für die der Fachterminus nicht mehr als ein Symbol ist.

4.2. Operationale Definition vs. Lexikondefinition

Im Zusammenhang mit der Einteilung von fachlichem Wissen in die Klassen „prozedurales Wissen“ (*operational knowledge*) und „deklaratives Wissen“ (*figurative knowledge*) wird bereits früh, ab den 1970er Jahren eine Überbetonung des letzteren und damit ein unzureichendes echtes Konzeptverständnis beklagt. Eine knappe Übersicht hierzu ist in [1], S. 347 ff. gegeben. Mit einer ähnlichen Argumentation wird das Faktenwissen als „träges Wissen“ angesehen, das mit dem Ziel einer angestrebten Handlungskompetenz in „Handlungswissen“ zu überführen ist. Als Weg dorthin kann eine „fortgesetzte Prozeduralisierung“ gesehen werden, durch die (Fakten-)Wissen in „Können“ übergeht ([6], S. 76). Folgt man konsequent diesem Gedanken der Prozeduralisierung, gelangt man zu einer operationalisierten Beschreibung physikalischer Begriffe und Konzepte, bei der weniger die Eigenschaften eines Konzeptes im Fokus stehen (das wäre dann eine „Lexi-

kon-Definition“), sondern durchführbare Handlungen.

Die Betonung operationaler Definitionen im Rahmen von *Physics by Inquiry* wirft Fragen nach weiteren Eigenschaften dieses Definitionstypus auf. Bortz/Döring nennen mit Bezug auf die Physik die folgenden Merkmale ([7], S. 62):

(1) *Die operationale Definition ist synonym mit einem korrespondierenden Satz von Operationen. (Der Begriff „Länge“ beinhaltet nicht mehr und nicht weniger als eine Reihe von Operationen, mit denen eine Länge ermittelt wird.)*

(2) *Ein Begriff sollte nicht bezüglich seiner Eigenschaften, sondern bezüglich der mit ihm verbundenen Operationen definiert werden.*

(3) *Die wahre Bedeutung eines Begriffes findet man nicht, indem man beobachtet, was man über ihn sagt, sondern indem man registriert, was man mit ihm macht.*

Die unter (1) erwähnte „Reihe von Operationen“ lässt sich somit als Prozedur auffassen. Oft handelt es sich dabei um eine Mess-Prozedur. Durchaus in Analogie zu Computer-Prozeduren müssen somit auch operationale Definitionen bestimmte Kriterien erfüllen, wenn sie brauchbar sein sollen. Als einen Mindestkatalog lassen sich folgende Kriterien anführen: a) Ausführbarkeit (*executability*); b) Eindeutigkeit (*uniqueness*); c) Vollständigkeit (*completeness*) und d) Endlichkeit (*finiteness*) (vgl. [7], S. 1759).

Für das in der Einführung angesprochene einfache Beispiel des Flächenbegriffs gelingt eine allgemeingültige Definition mithilfe von „Länge mal Breite“ nicht. An diesem einfachen und allen Lernenden gut vertrauten Beispiel lässt sich das Prinzip der operationalen Definition sehr gut einführen mit der Frage: Wie gelangt man zum numerischen Wert für eine bestimmte Fläche? Das gelingt dadurch, dass man eine Einheitsfläche, etwa ein Einheitsquadrat, festlegt und die zu bestimmende Fläche vollständig mit den Einheitsflächen bedeckt. Anschließend werden die Einheitsflächen gezählt bzw. aufsummiert. Bei diesem Vorgehen wird ein weiterer grundlegender Aspekt sichtbar: Ein *restloses* Bedecken durch Einheitsflächen – so dass es „aufgeht“ – ist im Allgemeinen nicht möglich. Der Prozess erfordert ein Abschätzen von Bruchteilen der Einheitsfläche und zeigt den Lernenden, dass Messen immer mit Unsicherheiten verbunden ist. Auf diesen Aspekt wird im Abschnitt 4.4 näher eingegangen.

Das zweite Beispiel illustriert, wie die Studierenden im durchgeführten Kurs an die Thematik der operationalen Definitionen herangeführt wurden, nachdem sie in den ersten Tagen viel mit einer denkbar einfachen Loch-Balkenwaage (siehe Abb. 1) gearbeitet haben:

Geben Sie eine operationale Definition des Begriffs „Gleichgewicht“ (an einer Balkenwaage).

Nehmen Sie der Einfachheit halber an, dass den Adressaten Ihrer Definition das folgende Arbeitsmaterial zur Verfügung steht:

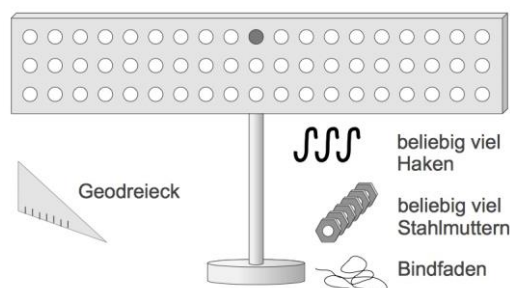


Abb.1: Material für Gleichgewichts-Definition

Wie zu erwarten, bereitet diese Aufgabe den Studierenden nur wenig Schwierigkeiten. Allerdings war die Allgemeingültigkeit ihrer Definitionen Gegenstand einiger Diskussionen und Korrekturen. Gilt die Definition auch dann, wenn man keine Informationen über die Ebenheit des Untergrunds hat? Die Notwendigkeit eines Lots musste teilweise in den Checkout-Dialogen herausgearbeitet werden.

Die operationale Definition des Gleichgewichts an der Balkenwaage kann im weiteren Verlauf als Bestandteil (als Teilprozedur) einer operationalen Definition für den Begriff der Masse dienen. Dieser wiederum wird benötigt, wenn später die Dichte von Körpern und Stoffen definiert wird, welche weiterhin eine Voraussetzung für die Definition des statischen Auftriebes ist. Auf diese Weise wird Studierenden bewusst, wie Fachbegriffen Bedeutung verliehen wird und dass Definitionen physikalischer Konzepte nicht „vom Himmel“ bzw. aus dem Lexikon fallen, sondern – zumindest prinzipiell – aus ausführbaren Operationen hervorgehen. Jeder Fachbegriff hat in diesem Sinn seine „Geschichte“, die zunächst in Alltagssprache „erzählt“ werden kann. Schließlich bildet das Verstehen um diese Zusammenhänge mithilfe einer Betonung operationaler Definitionen einen wesentlichen Teil von *Scientific Literacy*.

4.3. Denken in Verhältnissen (Proportionen)

Bereits seit den frühen 1970er Jahren wird in der US-amerikanischen physikdidaktischen Literatur beklagt, dass eine schwerwiegende Lücke in der kognitiven Entwicklung von Lernenden bis hin zum College-Eingangsniveau im Scheitern beim Schließen mithilfe von Proportionalitäten besteht. Einen knappen Überblick hierzu gibt Arons in [1], S. 4. Sehr aktuell ist auch die öffentliche Diskussion über das mathematische Niveau bundesdeutscher Studienanfänger. Die unbefriedigende Situation – es ist sogar von einer „Krise des Mathematikunterrichts“ die Rede – hat zu einem öffentlichen Brandbrief von 130 Experten geführt (vgl. [9]). Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass auch deutschen Studienanfänger ein gründliches Arbeiten mit funk-

tionalen Zusammenhängen im Kontext der Physik nicht schadet. Proportionale Zusammenhänge tauchen in der einführenden Physik an sehr vielen Stellen auf, etwa beim Dichtebegriff, in den Bewegungsgesetzen, als Hooke'sche Federkonstante, etc.

Das Konzept von *Physics by Inquiry* begegnet diesen Schwierigkeiten durch explizite und sich durch den gesamten Lehrgang ziehende wiederholte Übungen zum verbalen Interpretieren und Begründen auf der Basis von Verhältnissen.

Ein sehr trivialer Fall einer solchen Interpretation ist die eines reinen Zahlenverhältnisses, also etwa: „Was bedeuten 522/3 oder 3/522? Nun ließe sich als Antwort die Rechenvorschrift anwenden und daraus der sich ergebende Zahlenwert benennen. Für eine sorgfältigere Interpretation muss man sich aus den ersten Jahren des Mathematikunterrichts in Erinnerung rufen, dass wir zur Bestimmung von 522/3 eine „Abkürzung“ nehmen für das wiederholt nacheinander ausgeführte Subtrahieren der 3 von 522.

Von fast gleicher Einfachheit erscheint die Interpretation eines Verhältnisses zweier Größen, die mit der jeweils gleichen Einheit behaftet sind, also etwa $(522 \text{ cm}^3)/(500 \text{ cm}^3)$. Hierbei wird ein „Vergleich“ angestellt im Sinne von: Um wie viel ist das Volumen V_1 größer als V_0 ?

Schließlich haben wir es in der Physik häufig mit Verhältnissen von Größen zu tun, die nicht die gleiche Einheit tragen. Deren Interpretation ist jedoch insbesondere für Lernende nicht ohne Weiteres trivial. Was bedeuten $(17 \text{ g})/(5 \text{ cm}^3)$ oder $(5 \text{ m})/(2 \text{ s})$ oder $(9,81 \text{ m})/\text{s}^2$?

An diesen Stellen sind die Studierenden in *Physics by Inquiry* immer wieder explizit gefordert, klare und zunächst in Alltagssprache formulierte Interpretationen zu geben.

4.4. Are you certain? – Messunsicherheit von Anfang an

Dass der Thematik „Messunsicherheit“ eine wesentliche Bedeutung für eine empirische Wissenschaft innewohnt, ist unbestritten. Ist die Thematik aber auch von einer solchen Wichtigkeit, dass sie zu einem zentralen Anliegen in einer Physik-Anfängerveranstaltung wird?

Bei messenden experimentellen Arbeiten entstehen prinzipiell unvermeidbare und oft auch unvorhersehbare Messabweichungen. Das gilt umso mehr, wenn unerfahrene Studierende selbst experimentieren. Daraus ergibt sich ein Problemkomplex, der damit beginnt, dass die Lernenden in der Interpretation ihrer experimentellen Ergebnisse Schwierigkeiten haben, wahre Trends zu erkennen. Oder sie „erkennen“ in den Messreihen Trends dort, wo es sie nicht gibt. Dies führt zu Unsicherheiten und damit auch zu einem geringeren Maß an Selbstständigkeit beim experimentellen Arbeiten und begrenzt schließlich den eigentlich erreichbaren und beabsichtigten Entwicklungsfortschritt. Sind die Studie-

renden dagegen in der Lage, die von ihnen erzeugten Messreihen – in Kenntnis prinzipieller Messunsicherheit und unter Berücksichtigung konkreter, auf ihr Experiment bezogener Abschätzungen – angemessen zu beurteilen, ist mit einer Steigerung der Selbstständigkeit beim Experimentieren und auch des Autonomieerlebens der Studierenden zu rechnen.

Im Rahmen des Kurses *Physics by Inquiry* stoßen die Studierenden gleich zu Beginn auf die erforderliche Auseinandersetzung mit streuenden Messwerten. Nachdem die ersten operationalen Definitionen zum Gleichgewicht und anschließend daran zum Begriff der Masse anhand der simplen Loch-Balkenwaage erarbeitet sind, werden Massen mithilfe einer „kommerziellen“ Balkenwaage möglichst genau bestimmt. Dafür werden mithilfe einer lehrreichen Manipulation die Balkenwaagen aus dem Lehrmittelhandel in ihrer Anzeigegenauigkeit deutlich verbessert. An einem ihrer Arme wird ein Reiter angebracht und mittels eines Kalibrierungsverfahrens lässt sich eine Messung dann in der Genauigkeit eines Bruchteils der ursprünglich vorhandenen kleinsten Wagemassen angeben (siehe Abb. 2).

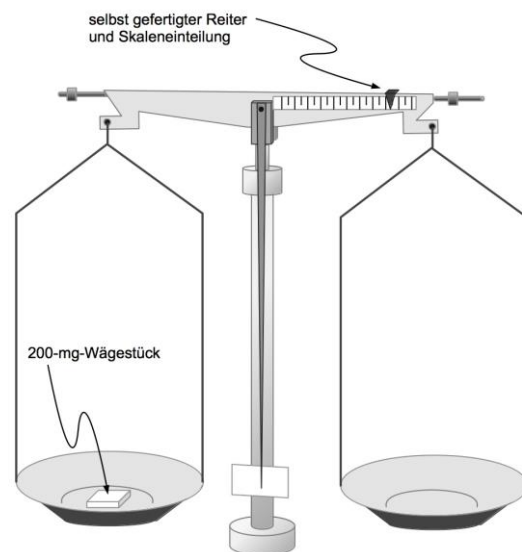


Abb.2: „Manipulierte“ Balkenwaage

Mithilfe dieser Eigenbau-„Präzisionswaage“ erhalten die Studierenden Messreihen mit einer deutlichen Streuung. Für Körper verschiedener Massen werden dann in statistisch vereinfachter Weise die Messunsicherheiten bestimmt und in der Form:

$$m = x \text{ g} \pm \Delta x \text{ g} \quad (3)$$

angegeben. Im weiteren Verlauf werden auch Volumina von Körpern möglichst genau und unter Berücksichtigung der für verschiedene Messzylinder ermittelten Messunsicherheiten bestimmt. Schließlich wird – wieder mithilfe einer operationalen Definition – die Dichte von Körpern bestimmt, deren „wahrer Wert“ als zwischen dem jeweils größtmöglichen und kleinstmöglichen Wert in (4) liegt.

$$\rho = (x \pm \Delta x) g / (y \pm \Delta y) \text{ cm}^3 \quad (4)$$

Die Studierenden erlangen im Verlauf der Auseinandersetzung mit Messunsicherheiten zunehmend mehr Sicherheit beim Interpretieren ihrer Messdaten. Auf dem Weg dahin eignen sie sich nützliche Strategien an: (1) das Erweitern (oder Maximieren) des Messintervalls der unabhängigen Variablen; (2) die Erfassung möglichst vieler Datenpunkte innerhalb dieses Messintervalls und (3) die in bestimmten Fällen erforderliche Durchführung wiederholter Messungen für jeweils einzelne Datenpunkte.

5. Wie bewerten Studierende das Konzept *Physics by Inquiry*?

Wie sehen die Studierenden selbst das Konzept? Im Folgenden werden einige Auszüge aus der Evaluation des Kurses gegeben, die zwar als repräsentativ für diesen Kurs gelten, jedoch keine verallgemeinerungsfähigen Aussagen darstellen sollen.

(1) Zum Prinzip „ideas first, name later“:

„[The 'idea first, name later' approach] allows the student to experiment and find out the information for themselves, and maybe even work for it ... When the name is finally given, that is the point where the mind can wrap it all together (sort of like putting all of the files about it in one folder).“

„If we were given a formula [for turning effect] from the beginning and the meaning of this effect, we would have simply followed formula and computed all of our results without talking about the idea and figuring it ourselves. Having the formula would only encourage us to memorize it and not go any further.“

(2) Zur Rolle der Begleitmaterialien (Textbook [4]):

„If we think of a [typical science] lab, the books provided in those labs can be seen as recipe books. They ... don't allow for the students to build their own physical concepts.“

„The bones of this instructional method is the textbook or modules provided. There are no definitions or terms but rather steps to be taken in order to discover them ... Students then build their own 'meat' of information in their notes ... The concepts, terms, and ideas are all recorded and explained by each individual during their learning experience.“

(3) Zur Funktion der „checkouts“

„Checking for understanding ... In most classes ... [instructors] ask if anyone has any questions and students are sometimes afraid to raise their hand and ask a question.“

„There is also the point of the extra questions that the professor asks that relate to the topic but aren't expressly asked in the book, so that he can get an idea of the students' complete comprehension.“

(4) Stärken und Grenzen des Gesamtkonzeptes

„Allowing students to discover how processes work can be much more time consuming than just provi-

ding that information ... It also requires [from instructors] a great deal of patience and shift of control. Current educators are comfortable with being the center of attention and fully in charge of the educational process.“

„One negative thing that could result ... if a group misunderstands a concept and there is no checkout with the teacher, they will learn that misconception.“

Die präsentierten Zitate stellen keineswegs eine „Positivauswahl“ dar, sondern spiegeln ein durchgängig positives Feedback der Studierenden. Eine Bestätigung dessen kann auch darin gesehen werden, dass es keinen „dropout“ in diesem Kurs gab und mit einer Ausnahme alle Studierenden die geforderten Mindestkriterien in den Examina erfüllten. Keiner der beiden letztgenannten Befunde ist für eine Anfängerveranstaltung in Physik selbstverständlich.

6. Ausblick: Potenzial von *Physics by Inquiry* für die Lehramtsausbildung

Insbesondere die angehenden Lehrerinnen und Lehrer in dem hier beschriebenen Kurs gaben in ihren Rückmeldungen an, nicht nur die Physik gelernt zu haben, sondern auch, dass sie hinsichtlich der erfahrenen Lehrmethode sehr für ihren zukünftigen Beruf profitieren konnten. Ein Befund, der als Impuls dienen soll, dieses Konzept in die Ausbildung von Physiklehrkräften auch an deutschen Hochschulen zu integrieren.

Angesichts oft überschaubarer Jahrgangsgrößen bei Physikstudierenden im Sekundarstufen-I-Lehramt sowie bei Studierenden des Primarstufenlehramtes mit naturwissenschaftlichem Schwerpunkt bietet sich der Einstieg in die Fachwissenschaft im Sinne von *Physics by Inquiry* geradezu an. Darüberhinaus erlaubt dieses Vorgehen eine sinnvolle Verzahnung fachwissenschaftlicher und fachdidaktischer Fragestellungen.

Eine beabsichtigte möglichst getreue Abbildung des Lehrkonzeptes erfordert die Erstellung eines zentralen Lehrmediums. Dieses leitet unter Berücksichtigung der hier vorgestellten Merkmale die Studierenden durch die jeweils vorgesehenen Fachinhalte und strukturiert diese durch die erforderlichen Experimente, Checkouts, etc. Für eine Orientierung lassen sich die Textbooks [4], [10] sowie z. B. die Tutorials [11], [12] nutzen. An der Pädagogischen Hochschule Schwäbisch Gmünd wird eine Implementierung in die Lehramtsausbildung erprobt, dafür werden zurzeit Materialien entwickelt. Bei Interesse steht der Autor gern für einen Austausch und Kooperationen zur Verfügung.

7. Literatur

- [1] Arons, Arnold B.: *Teaching Introductory Physics*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.

- [2] Arons, Arnold B.: *A Guide To Introductory Physics Teaching*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- [3] Arons, Arnold B.: Conceptual Difficulties in Science. In: Undergraduate Education in Chemistry and Physics: Proceedings of the Chicago Conferences on Liberal Education. (1986) No. 1, University of Chicago, 23-32
- [4] McDermott, Lillian C.: *Physics by Inquiry – An introduction to physics and the physical sciences*. Vol. I. John Wiley & Sons, Inc., 1996
- [5] Stein, Hana; Galili, Igal: The Impact of an Operational Definition of the Weight Concept on Students' Understanding. In: International Journal of Science and Mathematics Education (2015) 13: 1487-1515
- [6] Woitkowski, David: Fachliches Wissen in der Hochschulausbildung. Berlin: Logos (2015).
- [7] Bortz, J.; Döring, N.: *Forschungsmethoden und Evaluation*. Heidelberg: Springer (4. Aufl.), 2006.
- [8] Delaney, William: Limitation of Operational Definitions. In: International Journal of Theoretical Physics (1999) No. 6, Vol. 38, 1757-1762.
- [9] Agarwala, Anant: Abi für alle! In: Die ZEIT, No. 14 (2017), S. 13-15
- [10] McDermott, Lillian C.: *Physics by Inquiry*. Vol. II. John Wiley & Sons, Inc., 1996
- [11] McDermott, Lillian C.; Shaffer, Peter S.: *Tutorials in Introductory Physics*. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [12] McDermott, Lillian C.; Shaffer, Peter S.: *Tutorials in Introductory Physics – Homework*. New Jersey: Prentice Hall, 2002.